

УДК 004.932.2
doi:10.21685/2307-5538-2022-3-13

ДИЗЪЮНКТИВНАЯ МОДЕЛЬ ИНВАРИАНТА СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ

А. В. Григорьев¹, И. И. Кочегаров², Н. К. Юрков³, Н. С. Реута⁴, С. А. Бростиллов⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

^{1, 2, 4, 5} kipra@pnzgu.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время необходимым условием обеспечения безопасности распределенных природных и техногенных объектов является мониторинг этих объектов с целью идентификации их предаварийных состояний. *Материалы и методы.* Для контроля состояния объектов применялись методы бесконтактного оптического контроля уровня вибрационного сигнала объекта с помощью информационно-измерительных и управляющих систем, встраиваемых в существующие системы дистанционного зондирования Земли. *Результаты и выводы.* Проведен анализ состояния вопроса вибрационного мониторинга распределенных объектов. Обосновано практическое отсутствие методологических ограничений по частоте анализируемых вибраций для информационно-измерительных и управляющих систем, анализирующих изображения тестовых сегментов с вибрационным размытием. Обоснована субпиксельная точность анализаторов вибрационного приращения площади изображения круглой метки. Предложен метод оценивания общего уровня интенсивности вибрации по сложным траекториям, основанный на замещении реального вибрационного процесса эквивалентным прямолинейным вибрационным перемещением в плоскости объекта, при котором обеспечивается равное реальному относительное вибрационное приращение количества пикселей, формирующих изображение тестового сегмента круглой формы с вибрационным размытием. Предложена новая дизъюнктивная модель формирования следа вибрационного размытия изображения тестового сегмента круглой формы.

Ключевые слова: круглая метка, вибрационная диагностика, предаварийные состояния, природные и техногенные объекты, распределенные системы, инвариант, анализ, дистанционное зондирование Земли

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, номер проекта 20-38-90149.

Для цитирования: Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Реута Н. С., Бростиллов С. А. Дизъюнктивная модель инварианта состояния объекта контроля // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 106–113. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-13

DISJUNCTIVE MODEL OF THE INVARIANT CONTROL OBJECT STATUS

A.V. Grigor'ev¹, I.I. Kochegarov², N.K. Yurkov³, N.S. Reuta⁴, S.A. Brostillov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Penza State University, Penza, Russia

^{1, 2, 4, 5} kipra@pnzgu.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* Currently, a necessary condition for ensuring the safety of distributed natural and man-made objects is the monitoring of these objects in order to identify their pre-emergency conditions. *Materials and methods.* To control the state of objects, methods of non-contact optical control of the level of the vibration signal of the object were used with the help of IMMS, built into existing systems for remote sensing of the Earth. *Results and conclusions.* The state of the issue of vibration monitoring of distributed objects was analyzed. The practical absence of methodological restrictions on the frequency of the analyzed vibrations for IMMS analyzing images of test segments with vibrational blur is substantiated. The subpixel accuracy of the analyzers of the vibrational increment of the image area of a round mark is substantiated. A method for estimating the overall level of vibration intensity along complex trajectories is proposed, based on replacing the real vibration process with an equivalent rectilinear vibrational movement in the object plane, which provides an equal relative vibrational increment in the number of pixels that form an image of a round test segment with vibrational blur. A new disjunctive model for the formation of a trace of vibrational blurring of the image of a test segment of a round shape is proposed.

Keywords: round mark, vibration diagnostics, pre-accident conditions, natural and man-made objects, distributed systems, invariant, analysis, Earth remote sensing

Acknowledgments: the study was carried out with the financial support of the RFBR, project number 20-38-90149.

For citation: Grigoriev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Reuta N.S., Brostillov S.A. Disjunctive model of the invariant control object status. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):106–113. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-13

Введение

В настоящее время количество природных и техногенных катастроф, регистрируемых в течение заданного временного интервала, неуклонно повышается. Теория катастроф говорит о том, что приближающаяся аварийная ситуация в распределенных природных и техногенных системах характеризуется ростом вибрационной активности исследуемой системы.

При разработке информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) для вибрационного мониторинга распределенных объектов актуальна проблема адаптивности мониторинговой системы [1].

В период, когда объект контроля далек от предаварийного состояния, амплитуды параметров его вибраций весьма малы, а частоты весьма высоки. По мере приближения аварийной ситуации частота вибраций снижается, а их интенсивность возрастает. Для идентификации предаварийных ситуаций часто бывает достаточно измерять вибрации частотой до 60 кГц и амплитудой вибрационного процесса не более 10 мкм¹.

Методы измерения вибраций подразделяются на контактные и бесконтактные. Контактные методы основаны на том, что к объекту контроля крепится контактный датчик, который при растяжении-сжатии формирует электрический сигнал, пропорциональный силе воздействия на него. Такой датчик обладает инерционностью: он формирует дискретные отсчеты интенсивности вибрационного процесса через определенный временной интервал. В соответствии с теоремой Котельникова верхняя граничная частота измеряемой вибрации обратна удвоенному временному интервалу между двумя измерениями. А интервал между измерениями не может быть меньше времени преобразования усиления, в противном случае динамическая погрешность не позволит интерпретировать эти результаты как независимые [2]. В результате граничная частота вибрации, измеряемой контактными датчиками, не превышает 10 кГц (ГОСТ 32106–2013).

К бесконтактным методам измерения вибрации относятся методы лазерной виброметрии, основанные на явлении интерференции монохроматического света или на эффекте Доплера. Эти методы так же, как и описанные выше контактные, представляют информацию в виде дискретных отсчетов. Поэтому их верхняя граничная частота также обратна удвоенному значению интервала между этими отсчетами. Эта верхняя предельная частота измеряемой лазерными датчиками вибрации не превышает 10–15 кГц [3].

Выбор контактных датчиковых и бесконтактных лазерных вибрационных анализаторов в качестве систем мониторинга состояния распределенных объектов не представляется рациональным еще и потому, что размещение большого числа таких датчиков на распределенных объектах, считывание и анализ с них информации представляется сложной задачей, все решения которой являются затратными и малоэффективными, обладающими низкой надежностью и неустойчивыми к внешним природным и антропогенным воздействиям.

Применение параметров вибрационного размытия изображений сегментов в качестве инвариантов состояния распределенных объектов

Наиболее рациональным представляется применение систем, использующих в качестве инварианта интенсивности вибрационного воздействия различные параметры размытия тестовых сегментов, нанесенных на поверхность объекта. Информацию об интенсивности вибрационного процесса несет само размытое пятно, поэтому дискретизации при преобразовании вибрационного сигнала не происходит. В результате верхней граничной частоты анализируемого вибрационного сигнала практически нет. Распределенный объект обвешивать датчиками тоже нет необходимости. ИИУС для мониторинга состояния распределенных объектов может быть встроена в существующую систему дистанционного зондирования Земли космического или воздушного базирования.

Классический способ, реализующий данный подход, получил название «мерный клин» [4]. Для осуществления измерения вибрации по этому способу на контролируемую поверхность наносят тестовый объект в виде клина. Мерный клин наносят с таким расчетом, чтобы ожидаемая вибрация была направлена перпендикулярно основанию клина. При этом перемещение угловой точки во много раз превышает размах вибрации. К недостаткам этого метода следует

¹ ГОСТ 32106–2013. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосов и компрессорных агрегатов.

отнести требование, чтобы вибрация была перпендикулярна основанию клина. В реальных контролируемых системах это условие часто не может быть выполнено.

Вибрационное перемещение реальной точки на поверхности реального объекта контроля осуществляется, как правило, не по прямолинейной, а по эллиптической или еще более сложной траектории. Поэтому большую информативность обеспечит размытие тестового сегмента не клиновидной формы, а такой формы, для которой все направления инвариантны, т.е. круглой.

Способы измерения вибрации, основанные на анализе размытия изображения круглой формы, известны [5–7]. Способ, представленный в работе [3], получил дальнейшее развитие в статье [8]. Перечисленные способы основаны на измерении линейных фрагментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки. Вопросы восстановления геометрических параметров следа вибрационного размытия изображения круглой метки рассмотрены в статье [9]. В статье [10] представлен алгоритм поиска периферийных точек главного линейного сечения следа вибрационного размытия изображения круглой метки. Предметный анализ и обобщение этих способов применительно к задаче измерения вибрационных перемещений исследуемой точки на поверхности объекта контроля приведены в статье [11].

Недостатком этих методов является то, что погрешность измерения не может быть меньше расстояния между центрами соседствующих друг с другом пикселей в строке или столбце раstra регистрирующего устройства, т.е. меньше размера самого пиксела. Способ [12] позволяет получать субпиксельную точность, потому что измерительным сигналом для оценки интенсивности вибрационного процесса в нем является вибрационное приращение площади изображения круглой метки.

Наиболее эффективным представляется вариант многократного измерения площади изображения круглой метки с последующим вычислением инварианта интенсивности вибрационного процесса и статистической обработкой массива полученных результатов [13]. Исследование возможности применения вибрационного размытия изображения круглой метки для контроля технического состояния движущихся механизмов проведено в статье [14]. Принципы контроля технического состояния движущихся механизмов на основе анализа динамики вибрационного размытия изображения круглой метки изложены в статье [15].

Амплитуда эквивалентного прямолинейного вибрационного перемещения как оценочный характеристический параметр общей интенсивности вибрации объекта контроля

Предлагаемая в настоящей статье модель является логическим развитием метода, предложенного в патенте [12]. Общая интенсивность вибрационного процесса в этой модели оценивается амплитудой эквивалентного прямолинейного вибрационного перемещения в плоскости объекта. Эквивалентным такое перемещение является потому, что при нем вибрационное приращение площади изображения круглой метки становится таким же, как и при исследуемом перемещении. На рис. 1 представлена схема реализации эквивалентного прямолинейного вибрационного перемещения исследуемой точки на поверхности объекта контроля.

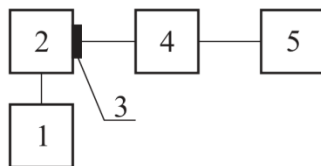


Рис. 1. Схема реализации эквивалентного прямолинейного вибрационного перемещения исследуемой точки на поверхности объекта контроля

Источник эквивалентного вибрационного сигнала 1 создает гармоническое механическое колебание, в результате которого несущая конструкция в форме прямоугольного параллелепипеда 2 с нанесенным на ее боковой грани тестовым сегментом круглой формы (круглой меткой) 3 перемещается в плоскости объекта. Регистрирующее устройство 4 формирует изображения круглой метки без вибрационного размытия и с таковым, которые передаются для обработки в вычислительное устройство 5. Интенсивность реального вибрационного сигнала оценивается амплитудой эквивалентного прямолинейного вибрационного перемещения, т.е. такой амплитудой прямолинейного вибрационного перемещения в плоскости объекта, при котором вибрационное приращение площади изображения круглой метки становится равным

вибрационному приращению площади изображения круглой метки при воздействии реальным вибрационным сигналом.

Из принципа геометрического подобия изображения оригиналу следует, что

$$\frac{r_t}{l_0} = \frac{A_x}{L_x}, \quad (1)$$

где r_t – радиус оригинала круглой метки, нанесенной на поверхность объекта контроля; l_0 – радиус изображения круглой метки, нанесенной на поверхность объекта контроля; A_x – амплитуда вибрационного перемещения исследуемой точки на поверхности объекта контроля; L_x – амплитуда вибрационного перемещения изображения исследуемой точки на поверхности объекта контроля.

Радиус r_t оригинала круглой метки, нанесенной на поверхность объекта контроля представлен в единицах измерения длины, например, в микрометрах. Радиус l_0 изображения круглой метки, нанесенной на поверхность объекта контроля представлен в пикселах (*pix*). Эта единица измерения расстояния на изображении представляет собой расстояние между центрами соседствующих друг с другом пикселей в строке или столбце раstra регистрирующего устройства. Таким образом, величина l_0 показывает, во сколько раз радиус изображения круглой метки превышает расстояние между центрами соседних пикселей. Величины A_x и L_x представлены в тех же единицах измерения, что r_t и l_0 соответственно.

По определению, площадь ΔS_{imtx} вибрационного приращения площади изображения круглой метки равна разности между площадью изображения круглой метки S_{imtx} с вибрационным размытием и площадью изображения круглой метки S_{imt0} без вибрационного размытия, т.е.

$$\Delta S_{imtx} = S_{imtx} - S_{imt0}. \quad (2)$$

Дизъюнкция позиций прямолинейного вибрационного перемещения в плоскости объекта

Тестовый сегмент круглой формы, в центре которого расположена исследуемая точка поверхности объекта контроля, совершает вибрационное перемещение. В каждый момент времени указанный тестовый сегмент излучает элементарный первичный или отраженный световой поток в сторону регистрирующего устройства. Каждая частица (фотон) этого светового потока преобразуется в элементарную порцию заряда в ячейке матрицы, например, прибора с зарядовой связью. В результате с каждой мгновенной фотографии в каждой элементарной позиции поступает энергия, участвующая в формировании зарядового рельефа, соответствующего следу вибрационного размытия изображения круглой метки. Таким образом, след вибрационного размытия изображения круглой метки понимается как объединение (дизъюнкция) мгновенных фотографий круглой метки при стремлении интервала между этими фотографиями к нулю. Полученная в результате модель следа вибрационного размытия изображения круглой метки является дизъюнктивной.

Дизъюнктивная модель прямолинейного вибрационного перемещения изображения круглой метки представлена на рис. 2.

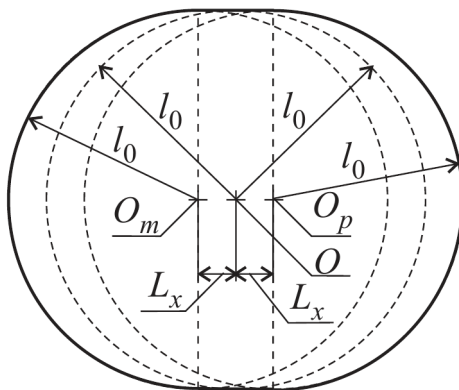


Рис. 2. Дизъюнктивная модель прямолинейного вибрационного перемещения изображения круглой метки

На рис. 2 штриховыми окружностями показаны контуры изображения круглой метки на исходной и крайней позициях вибрационного перемещения: O – положение исследуемой точки на исходной позиции вибрационного перемещения; O_m , O_p – положения движущегося изображения исследуемой точки в крайних позициях вибрационного перемещения. Из рис. 2 следует, что след вибрационного размытия изображения круглой метки состоит из трех сегментов: левого полукруга, правого полукруга и центрального прямоугольника. Суммарная площадь первых двух указанных сегментов равна площади изображения круглой метки на исходной позиции S_{imt0} . Последний из названных сегментов является вибрационным приращением изображения круглой метки ΔS_{imtx} .

**Относительное вибрационное приращение площади изображения
круглой метки как инвариант состояния объекта контроля**

Таким образом, из рис. 2 видно

$$\Delta S_{imtx} = 4l_0 L_x. \quad (3)$$

Отсюда

$$L_x = \frac{\Delta S_{imtx}}{4l_0}. \quad (4)$$

Принимая во внимание (2),

$$L_x = \frac{S_{imtx} - S_{imt0}}{4l_0}. \quad (5)$$

Из формулы (1) следует, что

$$A_x = \frac{r_t L_x}{l_0}. \quad (6)$$

Отсюда, принимая во внимание формулу (5),

$$A_x = \frac{r_t}{l_0} \frac{S_{imtx} - S_{imt0}}{4l_0}. \quad (7)$$

Следовательно,

$$A_x = r_t \frac{S_{imtx} - S_{imt0}}{4l_0^2}. \quad (8)$$

А поскольку l_0 является радиусом изображения круглой метки без вибрационного размытия, а S_{imt0} – площадь такого изображения:

$$S_{imt0} = \pi l_0^2. \quad (9)$$

Отсюда, принимая во внимание формулу (8),

$$A_x = r_t \frac{S_{imtx} - S_{imt0}}{4S_{imt0}} \pi \quad (10)$$

или

$$A_x = r_t \frac{\pi}{4} \frac{S_{imtx} - S_{imt0}}{S_{imt0}}. \quad (11)$$

А поскольку

$$\delta S_{imtx} = \frac{S_{imtx} - S_{imt0}}{S_{imt0}}, \quad (12)$$

где δS_{imtx} – относительное вибрационное приращение площади изображения круглой метки – принимая во внимание (11),

$$A_x = r_t \frac{\pi}{4} \delta S_{imtx} . \quad (13)$$

Таким образом, амплитуда вибрационного перемещения исследуемой точки прямо пропорциональна относительному вибрационному приращению изображения круглой метки. Сказанное относится не только к прямолинейному вибрационному перемещению, но и к вибрационному перемещению по любой траектории. Из этого следует, что относительное вибрационное приращение площади изображения круглой метки является инвариантом интенсивности вибрационного процесса и, следовательно, инвариантом состояния объекта контроля, с помощью которого возможна идентификация его предаварийного состояния.

Заключение

В статье обоснованы актуальность проблемы идентификации предаварийных состояний распределенных природных и техногенных систем и ключевая роль методов вибрационной диагностики при ее решении. Проведен предметный сравнительный анализ методов оценки интенсивности вибрационного сигнала. Проанализирован и обобщен опыт применения параметров вибрационного размытия изображений для оценки общей интенсивности вибраций. Обоснована целесообразность применения амплитуды эквивалентного прямолинейного вибрационного перемещения в качестве оценочного характеристического параметра общей интенсивности вибрации объекта контроля. Приведен и проанализирован пример дизъюнкции позиций прямолинейного вибрационного перемещения в плоскости объекта. Исследована возможность применения относительного вибрационного приращения площади изображения круглой метки в качестве инварианта состояния объекта контроля.

Список литературы

1. Калашников В. С., Лысенко А. В., Таньков Г. В. [и др.]. Формирование управляющего сигнала адаптивной информационно-измерительной и управляющей системы вибрационных испытаний // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 90–97. doi:10.21685/2307-4205-2020-4-10
2. Козырев Г. И., Кравцов А. Н., Усиков В. Д. Расчет частоты опроса в многоканальных информационно-измерительных системах с единых энергетических и точностных позиций // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 14–21. doi:10.21685/2307-5538-2020-2-2
3. Основы измерения вибрации. По материалам фирмы DLI / под ред. В. А. Смирнова. URL: http://www.vibration.ru/osn_vibracii.shtml (дата обращения: 14.06.2022).
4. Иориш Ю. И. Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы. Издание второе перераб. и доп. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. 773 с.
5. Патент 2535237 Российская Федерация. Способ измерения вибраций / Држевецкий А. Л., Юрков Н. К., Григорьев А. В., Затылкин А. В., Кочегаров И. И., Кузнецов С. В., Држевецкий Ю. А., Деркач А. В.; № 2013128327/28; заявл. 20.06.2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.
6. Патент 2535522 Российская Федерация. Способ измерения вибраций / Држевецкий А. Л., Юрков Н. К., Григорьев А. В., Затылкин А. В., Кочегаров И. И., Кузнецов С. В., Држевецкий Ю. А., Деркач А. В.; № 2013128329/28; заявл. 20.06.2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.
7. Патент 2726270 Российская Федерация. Способ контроля технического состояния механизмов / Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Реута Н. С.; № 2019136327; заявл. 12.11.2019; опубл. 10.07.2020, Бюл. № 19.
8. Grigor'ev A. V., Zatytkin A. V., Yurkov N. K. Method for contactless three-component vibration measurement // Measurement Techniques. 2017. Vol. 59. P. 1291–1296. doi:10.1007/s11018-017-1131-5
9. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. [и др.]. Восстановление геометрических параметров следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 2. С. 32–35.
10. Григорьев А. В., Гришко А. К., Данилова Е. А. [и др.]. Поиск периферийных точек главного линейного сечения следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 2. С. 35–38.
11. Grigoriev A. V., Danilova E. A., Yurkov N. K. Method of measurement vibration movements of material points on the surface of the controlled object // Proceedings of the 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM-2017. 2017. P. 589–592.

12. Патент 2765336 Российская Федерация. Способ контроля технического состояния механизмов / Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Реута Н. С. ; № 2021107352 ; заявл. 19.03.2021 ; опублик. 28.01.2022, Бюл. № 4.
13. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. [и др.]. Способ контроля технического состояния движущихся механизмов на основе статистического анализа вибрационного размытия изображения тестового объекта круглой формы // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 55–63. doi:10.21685/2307-4205-2020-3-7
14. Grigoriev A. V., Kochegarov I. I., Yurkov N. K. et al. Research on the possibility to apply vibration blurring of a round mark image in technical condition monitoring mechanisms // Procedia Computer Science. 2021. P. 736–742.
15. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. Принципы контроля технического состояния движущихся механизмов на основе анализа динамики вибрационного размытия изображения круглой метки // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2020. № 2. С. 119–131.

References

1. Kalashnikov V.S., Lysenko A.V., Tan'kov G.V. et al. Formation of the control signal of the adaptive information-measuring and control system of vibration tests. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(4):90–97. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2020-4-10
2. Kozyrev G.I., Kravtsov A.N., Usikov V.D. Calculation of the polling frequency in multichannel information and measurement systems from unified energy and accuracy positions. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2020;(2):14–21. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2020-2-2
3. Smirnova V.A. (ed.). *Osnovy izmereniya vibratsii. Po materialam firmy DLI = Fundamentals of vibration measurement. Based on the materials of the DLI company*. (In Russ.). Available at: http://www.vibration.ru/osn_vibracii.shtml (accessed 14.06.2022).
4. Iorish Yu.I. *Vibrometriya. Izmerenie vibratsii i udarov. Obshchaya teoriya, metody i pribory. Izdanie vtoroe pererabotannoe i dopolnennoe = Vibrometry. Measurement of vibration and shock. General theory, methods and devices. The second edition was revised and supplemented*. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noy literatury, 1963:773. (In Russ.)
5. Patent 2535237 Russian Federation. *Sposob izmereniya vibratsiy = Method of measuring vibrations*. Drzhevetskiy A.L., Yurkov N.K., Grigor'ev A.V., Zatytkin A.V., Kochegarov I.I., Kuznetsov S.V., Drzhevetskiy Yu.A., Derkach A.V.; № 2013128327/28; appl. 20.06.2013; publ. 10.12.2014, Bull. № 34. (In Russ.)
6. Patent 2535522 Russian Federation. *Sposob izmereniya vibratsiy = Method of measuring vibrations*. Drzhevetskiy A.L., Yurkov N.K., Grigor'ev A.V., Zatytkin A.V., Kochegarov I.I., Kuznetsov S.V., Drzhevetskiy Yu.A., Derkach A.V.; № 2013128329/28; appl. 20.06.2013; publ. 10.12.2014, Bull. № 34. (In Russ.)
7. Patent 2726270 Russian Federation. *Sposob kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya mekhanizmov = A method for monitoring the technical condition of mechanisms*. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Reuta N.S.; № 2019136327; appl. 12.11.2019; publ. 10.07.2020, Bull. № 19. (In Russ.)
8. Grigor'ev A.V., Zatytkin A.V., Yurkov N.K. Method for contactless three-component vibration measurement. *Measurement Techniques*. 2017;59:1291–1296. doi:10.1007/s11018-017-1131-5
9. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. et al. Restoration of geometric parameters of the trace of vibration blurring of the image of a round mark. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2021;2:32–35. (In Russ.)
10. Grigor'ev A.V., Grishko A.K., Danilova E.A. et al. Search for peripheral points of the main linear section of the trace of vibrational blurring of the image of a circular mark. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2021;2:35–38. (In Russ.)
11. Grigoriev A.V., Danilova E.A., Yurkov N.K. Method of measurement vibration movements of material points on the surface of the controlled object. *Proceedings of the 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM-2017*. 2017:589–592.
12. Patent 2765336 Russian Federation. *Sposob kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya mekhanizmov = A method for monitoring the technical condition of mechanisms*. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Reuta N.S.; № 2021107352; appl. 19.03.2021; publ. 28.01.2022, Bull. № 4. (In Russ.)
13. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. et al. A method for monitoring the technical condition of moving mechanisms based on statistical analysis of vibration blurring of the image of a round-shaped test object. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(3):55–63. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2020-3-7

14. Grigoriev A.V., Kochtgarov I.I., Yurkov N.K. et al. Research on the possibility to apply vibration blurring of a round mark image in technical condition monitoring mechanisms. *Procedia Computer Science*. 2021:736–742.
15. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. Principles of monitoring the technical condition of moving mechanisms based on the analysis of the dynamics of vibration blurring of the image of a round mark. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii = Bulletin of the St. Petersburg State University of Civil Aviation*. 2020;(2):119–131. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Валерьевич Григорьев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Aleksey V. Grigor'ev

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Игорь Иванович Кочегаров

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Igor' I. Kochegarov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Никита Сергеевич Реута

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Nikita S. Reuta

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Александрович Бростилов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Sergey A. Brostilov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 16.05.2022

Поступила после рецензирования/Revised 16.06.2022

Принята к публикации/Accepted 18.07.2022